

## Rhodopseudomonas palustris KK14를 이용한 소규모 돈분폐수처리공정의 최적화

김한수 · 오준현 · 김혁일<sup>1</sup> · 조홍연<sup>2</sup> · 양한철\*

고려대학교 식품공학과, <sup>1</sup>계명대학교 식품가공학과, <sup>2</sup>고려대학교 식품생명공학과

**초록** : 광합성세균을 이용한 농축산가의 소규모 가축 폐수처리공정 개발을 위한 연구의 일환으로 고농도에서 유기산의 자화율이 높은 *Rhodopseudomonas palustris* KK14를 사용하여 돈분폐수처리공정의 최적화를 flask-scale 및 laboratory-scale에서 실시하였다. 반연속식으로 실시한 flask-scale에서 광합성세균 반응조는 HRT 6일, 광합성세균오니량 5%(v/v), 반응오니량 10%(v/v)로 했을 때 안정된 83%의 COD 제거율 및 적절한 4~5 g/l의 MLSS가 유지되었다. 산생성 반응조와 광합성세균 반응조의 working volume을 각각 5.2l와 15l로 scale-up한 실험실적 실험에서는 원폐수 대비 COD와 BOD의 제거율이 각각 95%와 96%를 나타냈으며 광합성세균 반응조의 COD 용적부하율 및 오니부하율은 각각 3 kg COD/m<sup>3</sup>/day와 1.1 kg COD/kg MLSS/day를 유지함으로써 적당한 MLSS농도가 유지되었고 부가적으로 폐수처리가 진행되면서 악취가 제거되는 효과를 나타내었다(1994년 7월 8일 접수, 1994년 8월 3일 수리).

### 서 론

중소규모의 농축산가로부터 배출되고 있는 축산폐수 중 돈분폐수는 발생량에 있어 산업폐수나 생활폐수에 비해 미미하지만 BOD 20,000 ppm 이상의 고농도 유기폐수로 하천 수질오염의 주원인으로 지적되고 있다. 현재 널리 사용 중인 활성오니법은 시설비와 운전경비의 과다로 인한 재정적 부담, 운전조건의 까다로움 및 발생하는 잉여슬러지의 재처리 등의 문제점으로 인해 보급상의 어려움에 봉착하고 있으며 혐기성 소화에 의한 메탄발효법은 최종 방류수의 정화도가 낮은 결점으로 일반화되지 못하고 있는 실정에 있다.

광합성세균에 의한 고농도 유기폐수처리 방법은 고농도 유기폐수를 단 시간에 무회석으로 처리할 수 있고 광합성세균의 생육조건 및 영양요구성이 단순하기 때문에 폐수처리 시설의 설치비 및 운영비 부담이 적고 관리가 용이한 것으로 알려져 있다.<sup>1-4)</sup> 활성오니법의 슬러지가 다종의 미생물이 혼합되어 있고 응집제 처리시 혼입된 불용성 난분해성 물질의 과다, 악취 등으로 고행폐기물인 반면 광합성세균 폐수처리법의 슬러지는 광합성세균이 우점종이고 균체와 처리수가 제조제, 유기질비료, 토양개선편제로서 유효성이 보고된 바 있어<sup>5-8)</sup> 슬러지 및 방류수를 자원화할 수 있는 강점을 가지고

있다. 실제 균체를 시비한 밀감의 경우 수확량 증가, 당도상승, 맛, 색 등이 향상되는 효과를 보이고 있으며<sup>9,10)</sup> 건조균체가 아닌 균체현탁액을 수경재배지에 관수로서 순환시킨 결과 비료의 효율이 상승됨은 물론 연작장해가 완화 또는 제거되는 보고들이 있다.<sup>11,12)</sup>

본 연구는 농축산가의 소규모 돈분폐수처리에 있어 지금까지 국내에서 시도된 바 없는 광합성세균을 도입함으로써 처리조 운영관리상의 어려움을 해소시키고 동시에 폐수처리시 발생하는 슬러지와 방류수를 현지농업에 직접 이용할 수 있는 폐수처리공정을 개발할 목적으로 flask 및 실험규모의 처리조의 운전요구되는 조건들을 최적화하고자 하였다.

### 재료 및 방법

#### 시용균주

본 실험에 사용한 균주는 부영양화된 자연계 시료로부터 분리 동정하여 전보<sup>13)</sup>에서 보고한 바 있는 홍색비유황 광합성세균 *Rhodopseudomonas palustris* KK14를 사용하였다.

#### 대상폐수

대상폐수는 경기도 용인군 J 농장에서 배출되는 폐수

Key words : Photosynthetic bacteria, *Rhodopseudomonas palustris* KK14, Photosynthetic bacteria reactor

\*Corresponding author : H.-C. Yang

를 35 mesh 체로 걸른 폐수를 원폐수로 하여 4℃에 냉장보관하면서 실험에 사용하였다.

**산생성폐수의 조제 및 성상**

대상폐수를 전보<sup>13)</sup>에서 설정한 산생성 반응조의 최적 운전조건인 pH 5.0, 37℃, HRT 2일, 혐기적 조건에서 반연속식으로 정치배양하여 산생성폐수를 조제한 다음 수돗물로 희석, COD<sub>cr</sub>(Chemical Oxygen Demand)를 10,000 ppm으로 조정하였으며 이 때의 총 유기산 농도는 약 5,500 ppm이었다.

**유기산 분석**

유기산 분석은 gas chromatograph(Shimadzu, GC-14 A)를 사용하여 flame ionized detector(FID)로 분석하였다(Column; Glass column(3.2 mm ID×3 m), Column material; Carbopack B-DA 80/120 4% CW20M, Column temperature; 175℃, Injection temperature; 200℃, Detector temperature; 200℃, Carrier gas; Nitrogen(1.4 kg/cm<sup>2</sup>), Injection volume; 1 μl).

**균체량 측정**

MLSS(Mixed Liquor Suspended Solid)의 양은 상법에 따라 전보<sup>13)</sup>와 같이 측정하였으며 광합성세균의 균체량은 Cohen-Bazire 등의 방법<sup>14)</sup>에 준하여 acetone : methanol=7 : 2의 용매로 균체색소를 추출한 후 bacteriochlorophyll a의 최대 흡수과장인 770 nm에서 흡광도를 측정하였다.

**BOD<sub>5</sub>, COD<sub>cr</sub> 및 폐수분석**

BOD는 20℃에서 5일간 시료를 배양했을 때 소모된 산소량, COD는 산화제 중크롬산칼리(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)를 이용 유기물을 화학적으로 산화시킬 때 소모된 산소량을 각각의 상법<sup>15)</sup>에 따라 측정하였으며 폐수의 일반성분은 'Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater'<sup>15)</sup>에 따라 분석하였다. 시료는 각 처리단계 및 방류수의 폐수를 원심분리하지 않고 사용하였다.

**광합성세균 오니의 조제**

폐수처리활성이 높은 오니의 조제를 위해 보관중인 균주를 총 유기산 농도 6 g/l의 합성배지<sup>13)</sup>에서 1차 활성화시킨 후 상기의 산생성폐수에 1차 배양액 20%(v/v)를 접종하여 최적 생육조건인<sup>13)</sup> pH 7.0, 30℃, 4,000 lux, 혐기적 조건에서 4일간 정치 회분배양하였다.

**반연속식 광합성세균 반응조의 운전**

300 ml 배양병에 COD 10,000 ppm의 산생성폐수와 회분식으로 배양한 광합성세균 오니 20%(v/v)를 넣고, HRT(Hydraulic Retention Time), 오니의 seeding량 및 반송오니량 등이 폐수처리에 미치는 효과를 최적 배양 조건하에서 반연속식으로 7일간 운전하면서 COD, MLSS 및 bacteriochlorophyll a의 변화를 측정, 반응조를 최적화하였다.

**연속식 폐수처리공정의 실험실적 설계 및 운전**

혐기성 소화에 의한 산생성 단계와 광합성세균에 의해

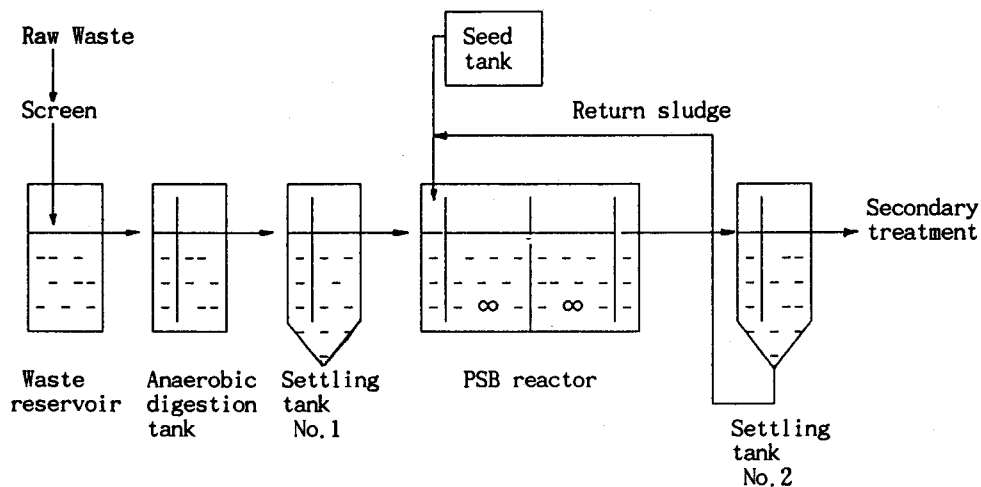


Fig. 1. Flow chart of the photosynthetic bacteria sludge process for the treatment of swine wastewater.

생성된 산의 자화단계를 중심으로 구성된 본 폐수처리 공정의 설계는 Fig. 1과 같다. 산생성 반응조는 working volume 5.2l의 밀폐된 원통형으로 온도유지를 위해 항온수조 상에 설치하였으며 반응조의 HRT조정은 정량 펌프를 이용하였다. 광합성세균 반응조는 광투과성의 투명 아크릴을 사용하여, working volume 1.5l, 6.0l, 6.0l, 1.5l의 밀폐시킨 사각 tank로 구성하고 각 tank를 직경 2.5 cm의 구멍으로 상하로 연결하여 교반장치가 부착된 항온수조 내에 위치시켰으며 필요에 따라 광합성세균오니와 반송오니를 광합성반응조에 첨가시켜줄 수 있도록 seed tank를 부착시켰다. Working volume 2.3l와 2.6l의 Imhoff cone 형 제 1, 제 2 침전조는 유입수와 유출수의 직접 접촉을 피하기 위해 용량이 1:2가 되도록 두 부분으로 나누고 액의 흐름을 상하로 조정하였다. 각 반응조는 운전시 밀폐시켰으며 HRT는 정량펌프를, 광도는 100 W 백열등을, 온도는 필요시 항온수조를 사용하여 유지하였다.

**결과 및 고찰**

**반연속식 배양**

연속식 광합성세균 폐수처리공정의 효율적인 설계와 운전조건의 설정을 위해 HRT, 중균 및 반송오니의 양 등이 폐수처리도에 미치는 영향을 유기산, COD, MLSS, bacteriochlorophyll a의 농도 증감을 반연속식으로 운전하면서 측정함으로써 최적 조건을 결정하고자 하였다.

1) HRT의 영향

폐수처리에 있어 경제적, 기술적으로 중요한 요소인 적정 체류시간을 검토할 목적으로 산생성폐수에서 배양한 광합성세균 오니를 배양병에 넣고 7일 동안 반연속식으로 산생성폐수를 HRT 2일, 3일, 6일로 치환하면서 운전한 결과는 Fig. 2와 같다. HRT 2일과 3일에서는 운전 2일째부터 유기산, COD는 증가하고 MLSS의 양이 감소하는 경향을, HRT 6일에서는 1일 처리에 의해 감소한 양이 운전 4일째까지 어느 정도 일정하게 유지되면서 3일 처리시 COD와 유기산이 각각 약 70%와 85%가 제거됨을 알 수 있었다. Bacteriochlorophyll a의 양은 HRT 6일에서도 운전 3일째부터 MLSS의 일정한 유지에도 불구하고 감소하는 현상을 보임으로써 광합성세균의 활성이 시간경과에 따라 차츰 감소함을 알 수 있었다. 저자 등이 보고한<sup>16)</sup> 두부공업폐수의 광합성세균 폐수처리공정의 경우 HRT 4일에서 운전 4일째 이후에도 일정하게 유지 또는 증가하는 결과와 달랐으며 이는 돈분폐수 중에 광합성세균의 생육저해인자가 함유되어 있음을 시사해 주었다.

2) 광합성세균오니의 추가율 영향

상기에서 문제점으로 제기된 시간경과에 따라 저하되는 광합성세균의 활력저하현상을 억제할 목적으로 교반, 혐기적 조건의 강화, 광합성세균오니의 첨가량 증대 등을 시도하였으나 유의할 만한 결과를 보이지 않음으로써 광합성세균오니의 추가율에 따른 폐수처리 효과와 광합성세균의 활력유지효과를 검토하였다(Fig. 3). 1일 5% 이상의 추가에 의해 운전 4일째 이후에도 안정하게 bacteriochlorophyll a와 COD가 유지됨을 알 수 있었으며

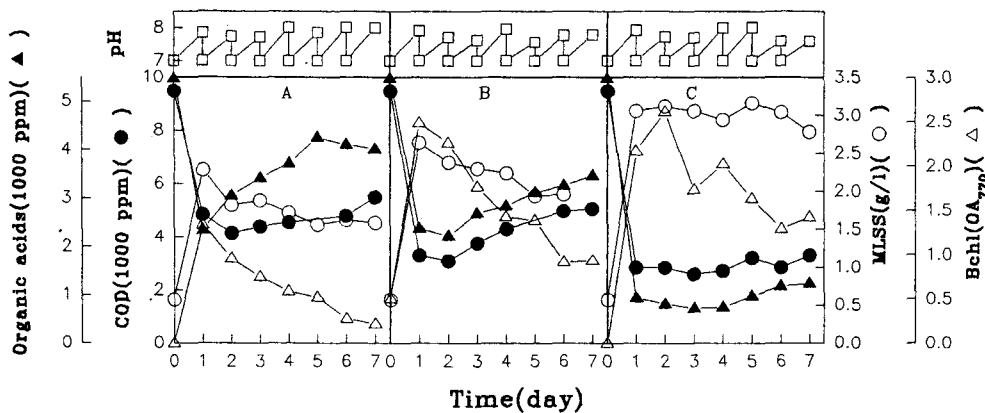


Fig. 2. Effect of HRT on COD, organic acids, MLSS and bacteriochlorophyll a in the PSB reactor by semi-continuous process. Cultivation was carried out in the anaerobic digested swine wastewater at 30°C, pH 7.0 under 4,000 lux. A, HRT 2 day; B, HRT 3 day; C, HRT 6 day

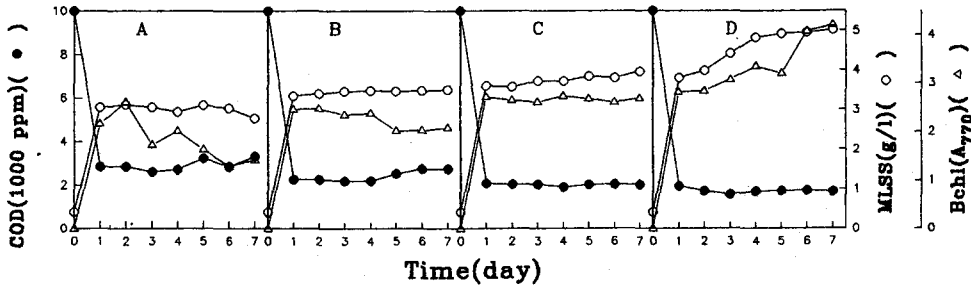


Fig. 3. Effect of seeding rate on COD, MLSS and bacteriochlorophyll a in the PSB reactor operated at HRT 6 day. Cultivation was carried out in the anaerobic digested swine wastewater at 30°C, pH 7.0 under 4,000 lux. A, None; B, 2% (v/v/day); C, 5% (v/v/day); D, 10% (v/v/day)

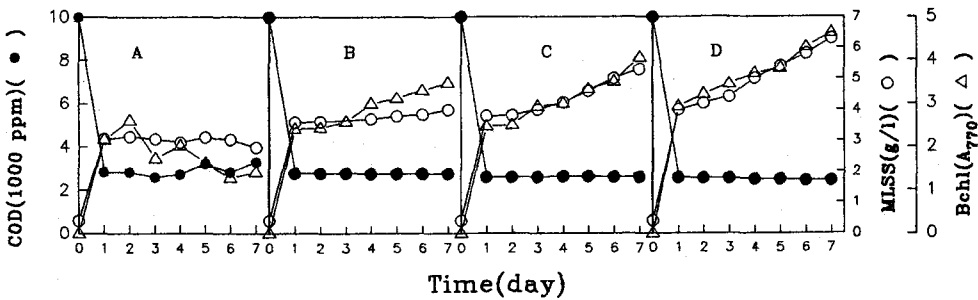


Fig. 4. Effect of return sludge on COD, MLSS and bacteriochlorophyll a in the PSB reactor operated at HRT 6 day. Cultivation was carried out in the anaerobic digested swine wastewater at 30°C, pH 7.0 under 4,000 lux. A, None; B, 10% (v/v/day); C, 30% (v/v/day); D, 50% (v/v/day)

COD 제거율 또한 대조구에 비해 약 10%가 증가된 80%의 양호한 결과를 나타내었다. 1일 10% 추가의 경우 MLSS가 지속적으로 증가하는 경향을 보임으로써 F/M (Food/Microorganism)비의 불균형으로 인한 오니의 bulking 현상을 일으킬 가능성이 우려되었고 COD의 제거율에 있어서도 5%의 추가사와 큰 차이가 없었기 때문에 적정 추가율을 1일 5%로 결정하였다. 추가방법에 있어 1일 1회 첨가와 분할첨가 간의 차이는 관찰할 수 없었다.

3) 반송오니의 반송을 영향

광합성세균오니의 추가에 따른 시설, 관리상의 문제점을 해결하기 위해 반송오니의 반송추가에 의한 처리조의 폐수처리 효율과 안정한 운전에 미치는 영향을 검토하였다. Fig.4에서와 같이 오니의 반송율을 총 오니의 1일 10%, 30%, 50%로 조절하면서 7일 동안 처리조의 변화를 관찰한 결과 오니의 반송율이 증가할수록 MLSS 및 bacteriochlorophyll a의 양은 증가하였으나 COD 제거율은 크게 변화하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 반송오니의 추가는 폐수처리 효율을 증가시키지 못하지만 Fig.2에서와 같은 운전 3일째부터의 COD 증

감현상을 억제해줌으로써 처리조의 안정화에 기여하는 효과를 나타내었다. 반송율과 방법은 MLSS, bacteriochlorophyll a, COD 등이 일정하게 유지되는 1일 10%의 양을 반연속식으로 반송하였다.

4) 광합성세균오니와 반송오니의 조합에 의한 영향

상기에서 검토한 Fig. 3, 4의 결과로부터 오니들의 최적 추가율과 단독 또는 혼합추가가 폐수처리에 미치는 효과를 조사하였다(Fig.5). 대조구에 비해 광합성세균오니 또는 반송오니의 추가시 처리조의 안정화를 기할 수 있었으며 1일당 광합성세균오니 5%와 반송오니 10%의 추가에 의해 처리 4일에서 대조구보다 약 13% 높은 83%의 COD 제거율을 나타내었다. 이상의 결과들은 광합성세균에 의한 돈분폐수처리공정의 설계에 있어 광합성세균의 활성저해를 방지하기 위해 처리조에 광합성세균 오니 또는 반송오니를 추가할 수 있는 seed tank의 부착이 필수적임을 시사해 주었다.

실험실적 폐수처리 공정의 설계 및 운전

혐기성 소화조와 광합성세균 반응조로 구성되어 있는

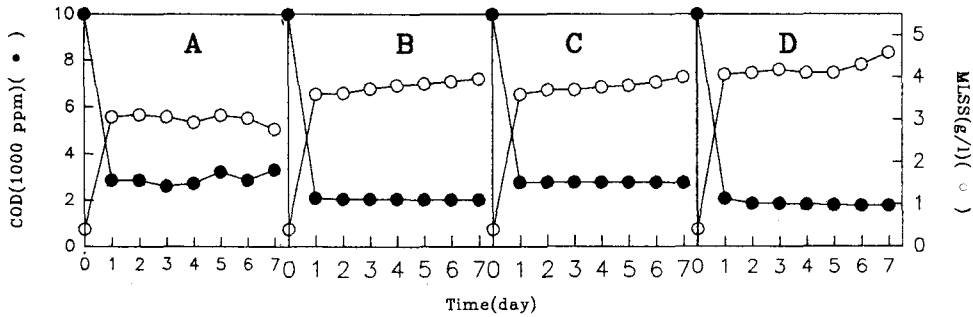


Fig. 5. Effects of seeding rate and return sludge on COD and MLSS in the PSB reactor operated at HRT 6 day. Cultivation was carried out in the anaerobic digested swine wastewater at 30°C, pH 7.0 under 4,000 lux. A, None; B, 5% (v/v/day) seeding; C, 10% (v/v/day) return sludge; D, 5% (v/v/day) seeding+10% (v/v/day) return sludge

Table 1. Results of swine wastewater treatment by laboratory-scale photosynthetic bacteria sludge process

	Raw waste	Anaerobic reactor	PSB reactor No. 1	PSB reactor No. 2	Effluent
pH	7.2	6.1	7.8	8.0	7.6
COD <sub>Cr</sub> (g/l)	22	18	8.8	3.8	1.0
BOD <sub>5</sub> (g/l)	20	17	NT <sup>#</sup>	NT <sup>#</sup>	0.83
MLSS (g/l)	1.0	0.62	3.3	2.6	0.61
TVA (g/l)	6.5	12	4.2	0.72	0.06
T-N (g/l)	2.5	2.3	1.2	0.74	0.51
NH <sub>3</sub> -N (g/l)	1.6	2.0	0.85	0.42	0.28
T-P (g/l)	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01
Sulfate (g/l)	1.4	0.56	0.27	0.19	0.16
Zn (ppm)	0.41	0.39	0.16	0.36	0.58
Pb (ppm)	ND <sup>*</sup>	0.02	0.28	ND <sup>*</sup>	ND <sup>*</sup>
Mn (ppm)	1.3	1.0	0.05	0.03	0.02
Cr (ppm)	0.08	0.01	ND <sup>*</sup>	ND <sup>*</sup>	ND <sup>*</sup>
Cu (ppm)	0.19	0.27	0.02	0.01	0.01

<sup>#</sup>NT, Not tested

<sup>\*</sup>ND, Not detected

본 돈분폐수처리공정의 특징은 각 반응조와 침전조의 내를 분할시킴으로써 유입수가 반응중인 폐수로 직접 혼합되지 않도록 고려하였으며 광합성세균 반응조를 상하로 연결함으로써 각 반응조에 유입된 폐수가 균일하게 처리된 후 다음 반응조로 유출될 수 있도록 설계하였다 (Fig. 1). 실험실적 폐수처리공정을 산생성단계인 혐기성 반응조는 working volume 5.2l, pH 5.5, HRT 6일로, 광합성세균 반응조는 조제한 광합성세균오니를 사용하여 working volume 15l, pH 7.0, HRT 5.5일, 광합성세균 오니 추가량 5%(v/v/day), 반응오니 추가량 10%(v/v/day)로 운전하면서 각 단계별 COD, MLSS, Kjeldahl nit-

rogen, NH<sub>3</sub>-N, 유기산 등을 측정하였다(Table 1). 원폐수는 산생성반응조를 거치면서 COD와 BOD가 약 15%, 총질소 10%, sulfate 60% 정도가 제거되고 총유기산은 약 81%가 증가되는 경향을 나타내었다. 광합성세균 반응조에서, COD 18,400 ppm, BOD 17,000 ppm의 폐수는 5.36일 동안 처리에 의해 COD 95%, BOD 96%의 제거율을 나타냄으로써 본 처리공정은 고농도 유기폐수의 공업적 처리 가능성을 제시해 주었다. 또한 고농도 유기폐수처리를 위한 메탄발효조의 평균처리기간 15일에 비해 단기간에 처리되는 점과 암모니아태 질소가 처리 1일 만에 60% 정도 제거됨으로써 악취도 크게 완화됨을

보였다. 운전중 광합성세균 반응조내의 오니부하율, COD 용적부하율 및 MLSS는 각각 1.1 Kg BOD/Kg MLSS/day, 3 kg COD/m<sup>3</sup>/day, 3 g/l를 나타냈으며 이는 광합성세균이 우점종을 유지하기 위해서는 최소한 0.8 kg BOD/kg MLSS/day의 오니부하율이 필요하다는 보고<sup>17,18)</sup>와 일치하는 결과를 보임으로써 반응조가 안정하게 운전되고 있음을 알 수 있었다.

이상의 결과들은 광합성세균에 의한 고농도 유기폐수 처리법의 보고들<sup>7,9,10,19)</sup>과 유사한 경향을 나타내었으나 최종처리수의 BOD가 방류수의 기준에 미치지 못하고 있어 향후 BOD처리효율이 향상된 reactor의 설계 및 운전조건의 개선, 활력이 높은 균주의 분리 및 육종, 타 폐수처리방법에 의한 2차 처리 등에 관한 연구가 요구되었다.

### 감사의 글

본 연구는 과학재단의 연구비(91-0204-10) 지원에 의하여 수행된 연구의 일부로 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- Hayashi, H., Nakano, M. and Morita, S. (1982) J. Biochem., 92-1805
- Madigan, M. T., Cox, J. C. and Gest, H. (1982) J. Bacteriol., 150-1422
- Sawada, H. and Roger, P. L. (1977) J. Ferment. Technol., 55-297
- Rafael, B., Jacobo, C. and Francisco, C. (1989) FEMS Microbiol. Lett., 58 : 129
- Anderson, T., Briseid, T. N., Omerod, J. and Thorud, M. (1983) FEMS Microbiol. Lett., 19-303
- Sasaki, K., Tanaka, T. and Hayashi, M. (1990) Appl. Microbiol. Biotechnol., 32-727
- Kobayashi, M., Fuji, J. and Shimamoto, T. (1979) Water Technol., 11-249
- 金桑正雄 (1978) 醱酵の工業, 36-934
- 小林達治 (1985) 用水と廢水, 27-40
- 小林正泰 (1978) 醱酵と工業, 36-753
- Kobayashi, M. and Kurata, S. (1978) Process Biochem., 13, 27
- 小林正泰 (1971) 食品工業, 14-19
- 김한수, 이태경, 김혁일, 조홍연, 양한철 (1994) 한국농화학회지, 37(4), 295-302
- Cohen-Bazire, G., Sistrom, W. R. and Stainer, R. Y. (1957) J. Cell. Comp. Physiol., 49-25
- Greenberg, A. E. *et al.* (1992) In 'Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater', 18th Ed., American Public Health Association, Inc., New York
- 서호찬, 임왕진, 조홍연, 양한철 (1993) 고려대학교 생물공학논문집, 5-42
- Hiraishi, A., Shi, J. L. and Kitamura, H. (1989) J. Ferment. Bioeng., 68-269
- Hiraishi, A., Morishima, Y. and Kitamura, H. (1991) Water Sci. Technol., 23-937
- Kobayashi, M. and Tchan, Y. T. (1973) Water Res., 7-1219

---

**Optimization for Small-scale Process of Swine Wastewater Treatment Using *Rhodopseudomonas palustris* KK14**

Han-Soo Kim, Chun-Hyun Oh, Hyuk-II Kim<sup>1</sup>, Hong-Yon Cho<sup>2</sup>, and Han-Chul Yang\* (Department of Food Technology, Korea University, Seoul 136-701, Korea, <sup>1</sup>Department of Food Science and Technology, Kemyung University, Taegu 704-701, Korea, <sup>2</sup>Department of Food and Biotechnology, Korea University, Chochiwon 339-700, Korea)

**Abstract :** To develop the treatment process of swine wastewater using *Rhodopseudomonas palustris* KK14 with high utilizable ability of organic acids, some operating conditions were investigated and optimized in flask-scale and laboratory-scale reactors. The optimal operating conditions in photosynthetic bacteria (PSB) reactor of semi-continuous type were obtained at HRT 6 day, 5% (v/v/day) seeding rate of PSB sludge and 10% (v/v/day) returning rate of PSB return sludge. Under the above operating condition, COD level of the wastewater (initial COD: 10 g/l) was reduced to about 1.7 g/l after 4 days treatment and MLSS was held constant at 4~5 g per liter. In laboratory-scale process consisted of 5.2 l anaerobic digestion reactor and 15 l PSB reactor, the total removal rates of COD and BOD were increased to 95% and 96% by the continuous operation for 5.36 days, respectively, showing 3 Kg COD/m<sup>3</sup>/day COD loading rate and 1.1 Kg COD/Kg MLSS/day sludge loading rate in PSB reactor. The offensive odor was considerably removed through the treatment process of swine wastewater.